干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

2000—2019年新疆大型湖泊湖冰物候时空变化特征

艾尔肯·图尔荪[1]， 玉素甫江·如素力[1,2]， 崔一爽[1]， 喀迪阿依·阿力木[1]，
米日阿依·买土地[1]

（1. 新疆师范大学地理科学与旅游学院/流域信息集成与生态安全实验室，新疆 乌鲁木齐 830054；
2. 新疆师范大学新疆干旱区湖泊环境与资源重点实验室，新疆 乌鲁木齐 830054）

摘 要：湖冰物候变化特征是全球气候变化过程的重要指示器。通过长时间序列MODIS数据、Landsat数据提取的湖泊数据集，综合分析了2000—2019年新疆大型湖泊湖冰物候的变化特征。结果表明：（1）近20 a新疆大型湖泊的开始冻结日呈现提前和推迟2种变化趋势，开始冻结日呈现推迟趋势的湖泊分别为博斯腾湖、赛里木湖、艾比湖、吉力湖、乌伦古湖、萨利吉勒干南库勒湖和鲸鱼湖，且大部分湖泊的开始冻结日推迟趋势在0.51~1.53 d·a^{-1}之间；开始冻结日呈现提前趋势的湖泊有3个，分别为阿牙克库木湖（变化趋势为−1.04 d·a^{-1}）、阿克赛钦湖（变化趋势为−0.41 d·a^{-1}）、阿其克库勒湖（−0.31 d·a^{-1}）。（2）湖冰完全覆盖期是重要的湖冰参数，湖冰覆盖期的延长或者缩短能够直接表示区域气候变化过程，新疆大部分湖泊湖冰覆盖期表现为缩短趋势，其中分布在新疆中北部的艾比湖、吉力湖和博斯腾湖等湖泊的湖冰覆盖期缩短较为明显，变化趋势分别为−1.76 d·a^{-1}、−2.13 d·a^{-1}和−0.81 d·a^{-1}；冰完全覆盖期延长的湖泊有3个，分别为阿牙克库木湖、阿其克库勒湖和鲸鱼湖，变化趋势分别为3.51 d·a^{-1}、1.54 d·a^{-1}和1.37 d·a^{-1}，这些湖泊均匀分布在昆仑山高原北翼。（3）新疆大型湖泊湖冰物候变化特征是受其自身条件（湖泊形态因子、湖泊面积等）及气候变化（气温、降水量等）等多种因素共同作用的结果。本研究探讨了气候变化环境下的新疆大型湖泊湖冰物候的冻融趋势及其变化模式，同时应用不同遥感数据和研究方法识别了湖冰，证实了MODIS数据反演湖冰物候的可行性。

关 键 词：大型湖泊；湖冰物候；变化特征；多波段阈值法；MODIS
文章编号：

湖泊作为水圈，陆地水循环和全球水平衡的重要组成部分，在全球气候、生态环境变化过程中起着重要作用[1-3]。湖泊的水循环过程不仅对当地的气候变化起着重要作用，而且与人类活动也有紧密地关系，尤其是在干旱区域水循环和人类活动中作用更加明显。新疆大部分湖泊均匀分布在高山与绿洲区域，这些湖泊为人类生产活动与生态环境平衡提供重要的水资源[4-8]。湖冰是记录湖泊环境变化过程的重要指示因子，湖冰物候、厚度和形状跟气候变化过程密切相关，湖冰的生消和持续时间直接受到气候变化的影响，所以在一些情况下湖冰物候比气温可以更精准地记录当地区域气候的变化过程[9-11]。湖冰能够为人类生活提供娱乐活动场所，在博斯腾湖举办的冰雪节每年可以接待几万名国内外旅客，并且每年有几千名旅客沿着博斯腾湖参加马拉松比赛，能够推动当地经济发展。此外，湖冰对野生动物的栖息空间也起着重要作用，博斯腾湖是中国西北干旱区域的野生鸟类栖息地之一，在冬天随着气温下降，博斯腾湖会迎来数万只水鸟栖息越冬[12-15]。因此，湖泊结冰和消融时间的精确

收稿日期：2021-11-04； **修订日期**：2022-04-19
基金项目：新疆维吾尔自治区科技创新基地建设计划项目（2020D04039）；国家自然科学基金项目（U1703341，41764003）；国家大学生创新项目（202110762004）资助
作者简介：艾尔肯·图尔荪（1994-），男，硕士研究生，主要从事资源环境遥感研究. E-mail: arkenjan@126.com
通讯作者：玉素甫江·如素力(1975-)，男，博士，教授，主要从事水文遥感与生态系统研究. E-mail: Yusupjan@xjnu.edu.cn

提取对人类活动和野生动物的栖息空间起着重要作用[16-18]。

在记录湖冰物候的研究过程中主要研究方法是通过光谱遥感和微波遥感数据，根据湖冰和湖水的反射率特征提取湖冰。在目前国内外研究中自动提取的湖冰物候研究方法较少，如Cai等利用MODIS产品为数据来源通过多种遥感算法监测湖冰物候[11]；此外，波段阈值法也广泛应用于湖冰研究当中[19-20]，如Latifovic等[5]利用AVHRR（Advanced very high resolution radiometer）数据应用波段阈值法提取了1985—2004年加拿大北部湖泊的湖冰物候，研究结果指出利用AVHRR数据提取的湖冰物候跟实测数据有较强的相关性。巩志[21]利用MODIS数据（MYD10A2）分析了2001—2010年青藏高原共59个湖泊的湖冰物候特征。MODIS和AVHRR等光谱遥感数据有多光谱和高时空分辨率优势，由于在冬天受到云、雪等因素的干扰，光谱遥感数据的湖冰提取精度受到一些影响，因此有些学者通过微波遥感来提取湖冰物候[22-23]。Dibike等[16]通过RADARSAT-2数据提取了加拿大北部湖冰物候特征。诸多研究结果可以看出，虽然通过微波遥感提取湖冰时可以减少雪、云等因素的干扰，但由于微波遥感的时间分辨率和空间分辨率较低，所以对新疆一些湖泊数量稀少且面积较小的区域提取湖冰物候的结果可能不佳[24-26]。Magnuson等[1]研究结果指出，1846—1995年之间北半球诸多湖泊和河流的开始结冰日出现明显地推迟，变化趋势为5.80 d·(100a)$^{-1}$，湖冰的开始融化日也显著提前，变化趋势为6.50 d·(100a)$^{-1}$，总体上北半球湖冰覆盖期明显地缩短。Du等[9]通过微波遥感数据分析结果指出，在2002—2015年北半球71个湖泊中共43个湖泊（约60.6%）的湖冰覆盖期有明显地缩短。Latifovic等[5]分析了从1950—2004年加拿大湖冰物候状况，研究结果指出湖冰的开始结冰日呈现提前趋势，为0.12 d·a^{-1}；湖冰的开始融化日呈现提前趋势，为0.18 d·a^{-1}。王智颖等[26]用MODIS数据对2000—2015年青藏高原上面积大于100 km^{2}的湖泊湖冰物候进行了分析，研究结果指出青藏高原北部湖区开始冻结期较早，而完全融化期较晚，湖冰完全封冻期较长；青藏高原南部湖区开始冻结时间较晚，完全消融时间早，湖冰持续时间较短，且冰情变化趋势主要受温度、风速等自然要素的影响。

本文以新疆10个大型湖泊为例（萨利吉勒干南库勒湖面积小于100 km^2），通过250 m空间分辨率的MODIS数据研究了新疆大型湖泊长时间序列湖冰物候及其变化模式，同时分析了湖泊发育过程和湖泊要素变化。本文利用光学影像、遥感反演、算法模型、统计分析等方法阐明了新疆大型湖泊湖冰物候变化特征，揭示了气候变化背景下的湖冰物候变化模式，为干旱区域水循环与气候变化奠定了理论和研究技术基础，同时也为新疆大型湖泊治理、湖泊生态环境保护提供了方法指导。

1 研究区概况

新疆地处中国西北干旱区，属温带大陆性气候，具有独特的山地-绿洲-荒漠生态系统，面积约占全国陆地总面积的1/6，是“一带一路”经济带的核心区。新疆位于中国北部的阿尔泰山和南部的昆仑山之间，天山横穿该地区，此外，塔里木盆地和准噶尔盆地位于3座山脉之间，形成了“三山夹两盆”的独特地形（图1）。新疆边缘由积雪覆盖的山脉围绕着盆地，在盆地内广泛分布沙漠和绿洲，这种奇特地貌类型使新疆形成大量高山冰川围绕沙漠的独特景观。由于新疆气候较干燥、降水量稀少、蒸散发高于降水量，新疆大部分区域植被覆盖率较低，生态系统较薄弱，是气候变化与人类活动较为敏感的区域。天山是塔里木河的发源地同时也是塔里木盆地的主要水资源的源地，对绿洲的生态环境和人们生产活动有非常重要的作用[11]。

2 数据与方法

2.1 数据来源

本文利用MOD09GQ（Terra）和MYD9GQ（Aqua）空间分辨率为250 m的2种MODIS数据集。MOD09GQ数据共有2个地表反射率波段，覆盖0.620~0.876 μm的光谱范围，MOD09GQ的可用时间范围是2000年8月1日至今一直持续观测地球，MYD9GQ的可用时间范围为2002年8月1日至今。

Landsat卫星是USGS和NASA的一项联合探索计划，从1972年至今一直持续观测地球，共有近50 a的遥感监测记录。Landsat卫星大约每2周以30 m的分辨率对整个地球表面成像多光谱数据。本文选择1978—2020年云覆盖率小于10%的Landsat影

像，获取新疆大型湖泊的湖泊面积数据，并且提取了湖泊矢量数据（表1）。

数字高程模型（DEM）是通过一定的地形海拔数据，能够实现对全球表面地形的信息化模拟。本文所选择的DEM数据来自中国科学院资源环境科学数据中心（http://www.resdc.cn），该数据集为基于最新的SRTM V4.1数据经整理拼接生成的90 m的分省数据，数据采用WGS84椭球投影。

2.2 研究方法

2.2.1 水体提取 改进的归一化水体指数（mNDWI）、归一化的水体指数（NDWI）和强化植被指数（EVI）等指数结合提取了地表水并且有效地排除了植被等干扰因素。水体的分类标准是：如果同时满足 mNDWI>NDVI、EVI<0.1 和 mNDWI>EVI 并且 EVI<0.1 这2种条件的时候就把地表要素分类为水体，如果无法满足这些条件时分为非水体[26-27]。各指数计算公式如下：

$$\mathrm{NDVI}=\frac{(\mathrm{Nir}-\mathrm{Red})}{(\mathrm{Nir}+\mathrm{Red})} \tag{1}$$

$$\mathrm{mNDWI}=\frac{(\mathrm{Green}-\mathrm{Swir})}{(\mathrm{Green}+\mathrm{Swir})} \tag{2}$$

$$\mathrm{EVI}=2.5\times\frac{(\mathrm{Nir}-\mathrm{Red})}{(\mathrm{Nir}+6\mathrm{Red}-7.5\mathrm{Blue}+1)} \tag{3}$$

式中：Red、Green、Blue、Nir和Swir分别为Landsat数据的红色波段（630~630 nm）、绿色波段（525~600 nm）、蓝色波段（450~515 nm）、近红外波段（845~885 nm）和短波红外波段（1560~1660 nm）。

2.2.2 湖冰物候提取 基于冰和水在多光谱遥感的分类特征发现一般情况下水和冰在近红外波段的反射率均小于冰和水在红外的反射率，而植被、土壤等其他地表物在红外波段的反射率均低于其在近红外波段的反射率，因此根据近红外和红外2个波段的反射率差值可以精确的提取湖冰，并能够有效地消除部分大气影响和系统误差。在进行波段相减后的影像，湖冰在近红外的反射率较大，而湖水的反射率较小，因此波段差值结合阈值法可以很好地对湖冰进行监测，计算公式如下[28]：

$$\begin{cases}\mathrm{Band1}-\mathrm{Band2}>a\\ \mathrm{Band2}>b\end{cases} \tag{4}$$

式中：Band1、Band2分别为MODIS近红外波段（620~670 nm）与红外波段（841~876 nm）的反射率；a、b为根据目视解译或者直方图方法获得的湖冰监测的阈值，即2波段反射率差值大于a且Band2反射率大于b时，该像元定义为湖冰。

为便于自动提取湖冰不同状态的时间节点信息，本文将湖泊开始冻结日期定义为下半年湖冰比例（即湖冰面积与湖泊面积的比值）为10%的日期；湖泊完全冻结日期定义为下半年湖冰比例为90%的日期；湖泊开始消融和完全消融日期则分别定义为上半年湖冰比例为90%、10%的日期，湖冰完全覆

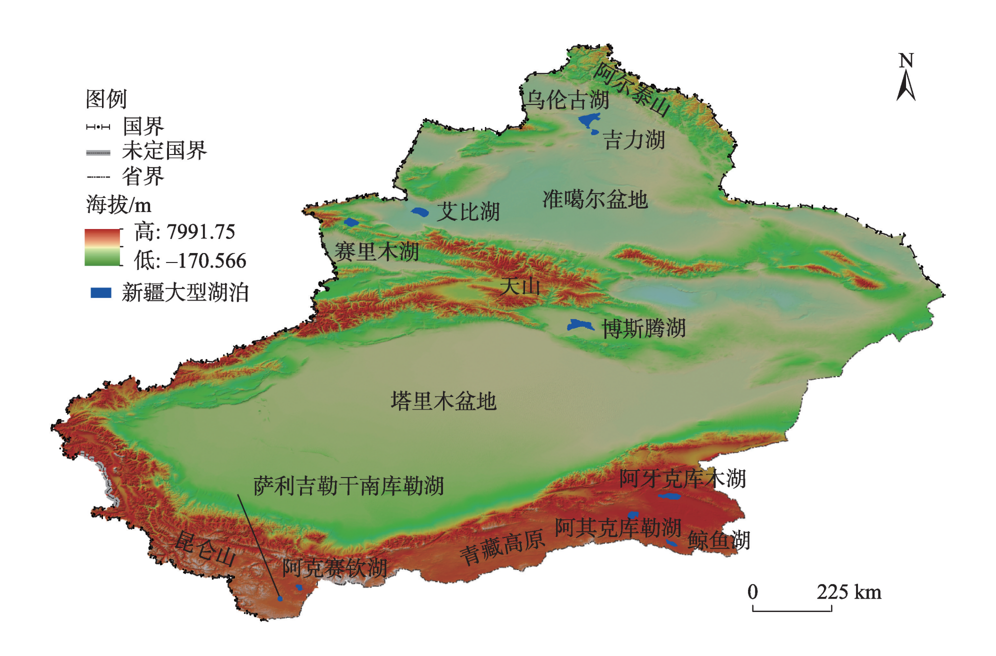


图1 研究区概况

Fig. 1 Overview of the study area

表1 新疆主要湖泊的面积、海拔高度和矿化度

Tab. 1 Area, elevation and salinity of large lakes in Xinjiang

湖名	2020年湖泊面积/km²	海拔/m	矿化度
艾比湖	1148.14	194	咸水湖
博斯腾湖	1069.25	1050	淡水湖
赛里木湖	461.01	2072	淡水湖
乌伦古湖	1069.25	478	淡水湖
吉力湖	191.78	479	淡水湖
阿克赛钦湖	301.52	4844	咸水湖
阿牙克库木湖	1137.76	3876	咸水湖
鲸鱼湖	414.96	4713	淡水湖
萨利吉勒干南库勒湖	72.63	5185	咸水湖
阿其克库勒湖	569.07	4251	咸水湖

盖期是记录湖冰变化过程的物候要素，湖冰覆盖期的变化能够直接表示区域气候变化特征，尤其对于新疆这样的典型干旱区域来说，湖冰覆盖期的变化趋势能精确地反映气候变化特征，计算方法如下[29]：

$$\text{湖冰物候}=\begin{cases}\text{FUS, if IA}\geqslant 0.1\times\text{LA}\\ \text{FUE, if IA}\geqslant 0.9\times\text{LA}\\ \text{BUS, if IA}\geqslant 0.9\times\text{LA}\\ \text{BUE, if IA}\geqslant 0.1\times\text{LA}\end{cases}\qquad(5)$$

式中：FUS、FUE、BUS和BUE分别为湖泊开始冻结日、完全冻结日、开始消融日和完全消融日；LA和IA分别为湖泊面积和湖冰面积。

3 结果与分析

3.1 新疆大型湖泊面积时空变化

新疆10个湖泊在1970s初期的总面积为5873.91 km²，到1990s初期为5263.71 km²，2000年为5952.38 km²，2011年为7446.94 km²。结合图2可知，湖泊面积经历了"先大幅下降后快速上升"的过程。

1987—2020年分布在不同地理位置的10个大型湖泊面积呈现显著地空间差异特征。其中，艾比湖的面积虽有增加趋势，但变化趋势不一致，1990—2004年湖泊面积呈现波动性增加趋势，2005年开始湖泊面积呈现减少趋势，且2015年的湖泊面积最小，为1034.58 km²（图3a）。博斯腾湖面积的变化趋势较为复杂，1987—2000年湖泊面积呈显著增加趋势，由1987年的947.48 km²扩张为2000年的1125.34 km²，但2000年开始湖泊面积开始退缩，至2013年湖泊面积为925.27 km²，相比2000年湖泊面积总共减少了200.03 km²（−17.80%）；2014湖泊面积开始增加，至2020年达到1069.24 km²；虽然1994、2009年和2013年湖泊面积呈现减少趋势，但总体上湖泊面积呈增加趋势（图3b）。分布在新疆北部的赛里木湖、乌伦古湖和吉力湖的面积总体上无显著变化，赛里木湖的面积由1989年的455.89 km²增加到2020年的461.01 km²，1989—2020年出现5.12 km²的面积波动；1992—2020年乌伦古湖的面积增加了13.25 km²，从空间变化趋势可以看出湖泊东南湖岸呈减少趋势；吉力湖的面积1992—2020年没有发生显著变化，总体上保持稳定趋势（图3c）。阿其克库勒湖的面积呈波动性增加趋势（图3d），湖泊面积由1992年的381.53 km²增加到2020年的569.07 km²，其中2007—2014年的面积增速最大，总体上1992—2020年湖泊面积一共增加了187.54 km²

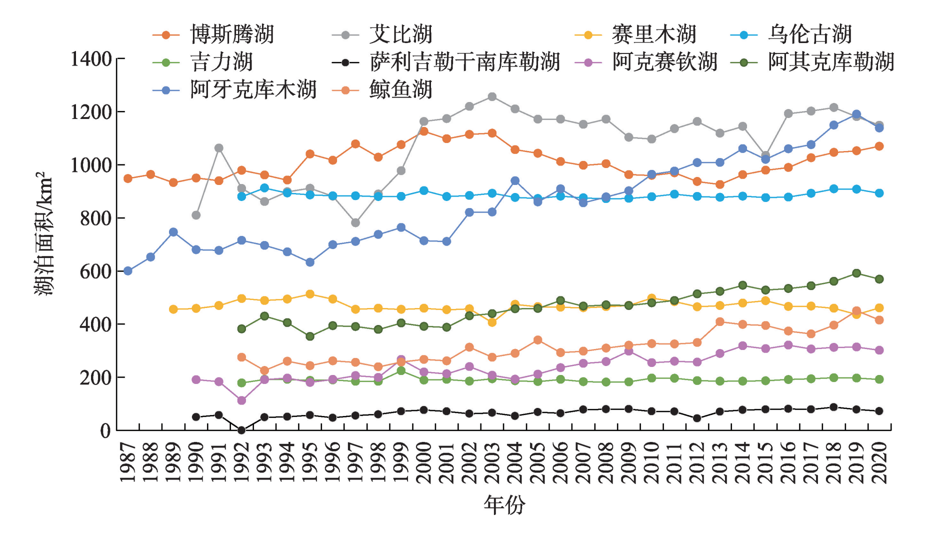


图2 1987—2020年新疆大型湖泊面积变化

Fig. 2 Area variation of large lakes in Xinjiang during 1987—2020

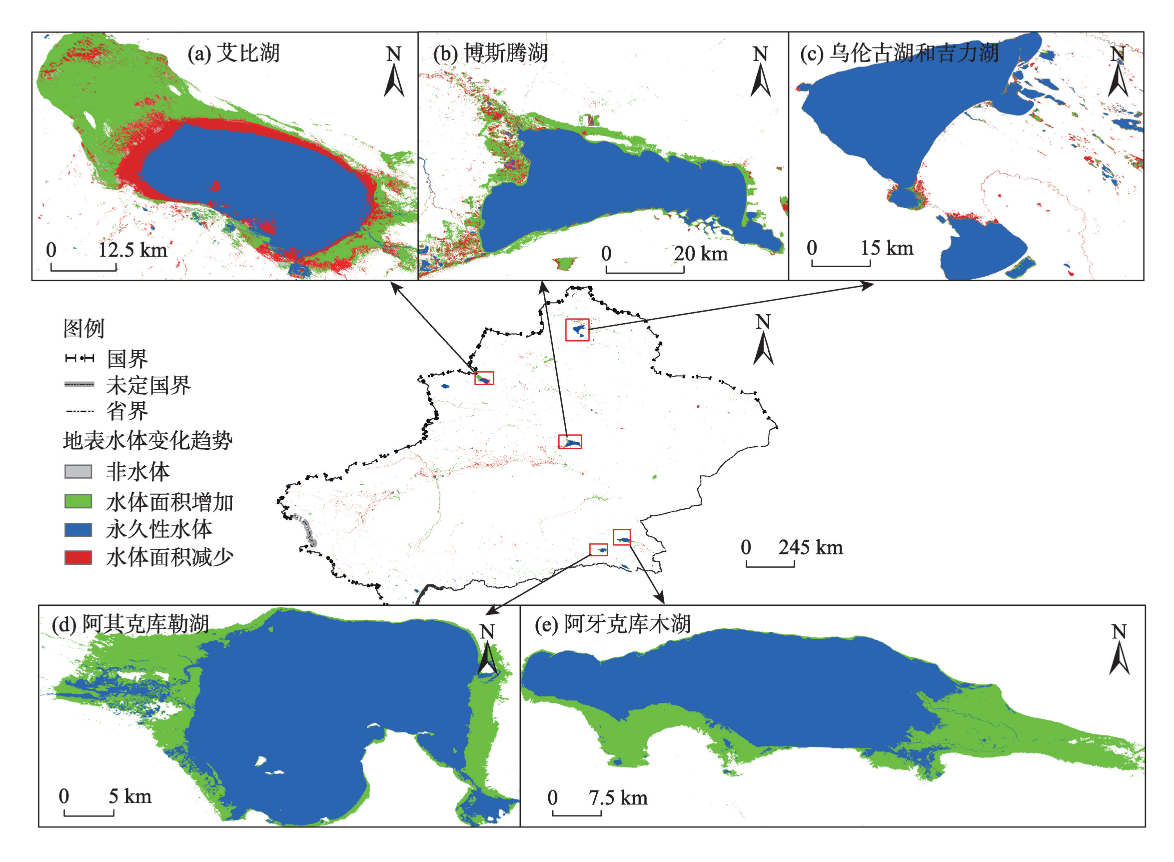


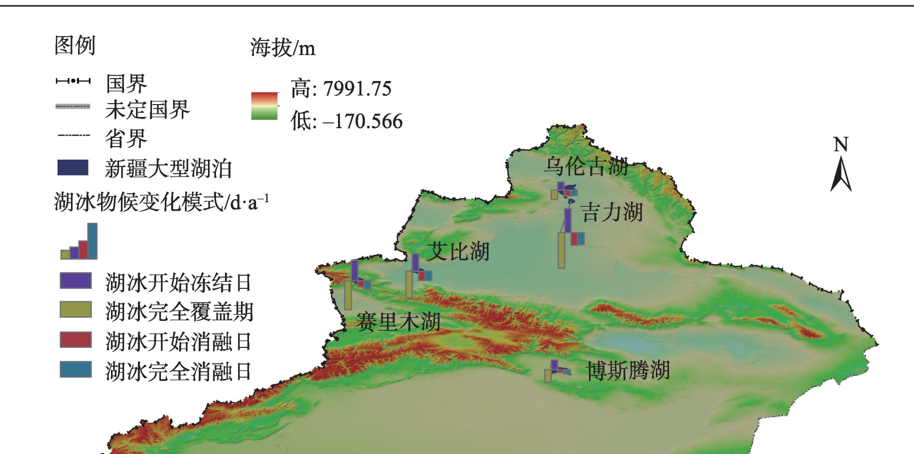
图3 1987—2020年新疆大型湖泊面积空间变化

Fig. 3 Area spatial variation of large lakes in Xinjiang during 1987—2020

(49.15%)。阿牙克库木湖的面积总体上保持增加趋势(图3e),由1992年的600.04 km^2扩张到2020年的1137.76 km^2;1987—2020年阿牙克库木湖面积一共增加了537.72 km^2,其中2001—2004年之间阿牙克库木湖的面积增加更为突出,湖泊面积一共增加了228.77 km^2。

3.2 湖冰物候时空变化

图4为2000—2019年新疆大型湖泊湖冰物候模式的空间分布。将新疆大型湖泊的开始冻结日、湖冰完全覆盖期、湖冰开始消融日和湖冰完全消融日的变化趋势组合成一个完整的柱状图来表达,在整个柱状图中每个柱子的朝向表示湖冰物候变化的提前和推迟,朝上时为推迟的趋势,朝下时为提前的趋势。新疆大型湖泊的开始冻结日呈现提前和推迟的2种变化趋势,在研究期间开始冻结日呈现推迟趋势的湖泊分别为博斯腾湖、赛里木湖、艾比湖、吉力湖、乌伦古湖、萨利吉勒干南库勒湖和鲸鱼湖,且大部分湖泊的开始冻结日推迟趋势在0.51~1.53 $d\cdot a^{-1}$之间;开始冻结日呈现提前趋势的湖泊有3个,分别为阿牙克库木湖(变化趋势为−1.04 $d\cdot a^{-1}$)、阿克赛钦湖(−0.41 $d\cdot a^{-1}$)、阿其克库勒湖(−0.31 $d\cdot a^{-1}$),主要位于新疆西南部地区,占总湖泊总数的30%。近20 a新疆共有6个湖泊完全消融日呈现提前趋势,主要为分布于新疆中北部的博斯腾湖、艾比湖、赛里木湖、吉力湖、萨利吉勒干南库勒湖和乌伦古湖,其变化趋势分别为−0.57 $d\cdot a^{-1}$、−0.61 $d\cdot a^{-1}$、−0.52 $d\cdot a^{-1}$、−0.78 $d\cdot a^{-1}$、−0.28 $d\cdot a^{-1}$和−0.36 $d\cdot a^{-1}$;完全消融日呈现推迟趋势的湖泊主要分布于昆仑山高原区域,其中阿牙克库木湖、鲸鱼湖的湖冰完全消融日的推迟趋势较显著。湖冰完全覆盖期是记录湖冰变化过程的物候要素,湖冰覆盖期的变化能够直接表示区域气候变化特征,尤其对于新疆这样的典型干旱区域来说,湖冰完全覆盖期的变化趋势能精确地反映气候变化特征。新疆大部分湖泊的湖冰完全覆盖期呈现明显的缩短,其中艾比湖、吉力湖、博斯腾湖等湖泊的湖冰完全覆盖期缩短较为显著,变化趋势分别为−1.76 $d\cdot a^{-1}$,−2.13 $d\cdot a^{-1}$、−0.81 $d\cdot a^{-1}$,这些湖泊主要分布在新疆中北部;湖冰完全覆盖期延长的湖泊有3个,分别为阿牙克库木湖、阿其克库勒湖和鲸鱼湖,变化趋势分别为3.51 $d\cdot a^{-1}$、1.54 $d\cdot a^{-1}$、



注：在整个柱状图中每个柱子的朝向表示湖冰物候变化的提前和推迟，朝上时为推迟的趋势，朝下时为提前的趋势。

图4　2000—2019年新疆湖冰物候变化模式的空间分布

Fig. 4　Spatial distribution of lake ice phenology pattern in Xinjiang during 2000—2019

1.37 d·a⁻¹，这些湖泊均匀分布在昆仑山高原北翼。

3.3　湖冰完全覆盖时期年际变化

湖冰完全覆盖时期是湖冰物候的重要参数，能够直接表示湖冰物候的变化过程。图5为2000—2019年新疆大型湖泊湖冰完全覆盖期的年际变化。从图中可知，近20 a虽然一部分湖泊的湖冰完全覆盖期呈现延长趋势，但大部分湖泊的湖冰完全覆盖期呈缩短趋势，其中阿牙克库木湖在2001、2002、2004年和2005年没有完全的结冰。湖冰完全覆盖期延长的湖泊主要有阿牙克库木湖、阿其克库勒湖和鲸鱼湖，变化趋势分别为3.51 d·a⁻¹、1.54 d·a⁻¹和1.37 d·a⁻¹；除此之外，湖冰完全覆盖期缩短的湖泊分别为博斯腾湖、艾比湖、乌伦古湖、吉力湖、赛里木湖、阿克赛钦湖和萨利吉勒干南库勒湖，完全覆盖期变化趋势分别为−0.81 d·a⁻¹、−1.76 d·a⁻¹、−0.61 d·a⁻¹、−2.31 d·a⁻¹、−1.84 d·a⁻¹、−0.17 d·a⁻¹和−0.11 d·a⁻¹。根据分析结果可知，地理位置分布在昆仑山高原的湖泊湖冰完全覆盖期总体上呈增加趋势，其中增加幅度最大的是阿牙克库木湖；分布在平原区域的湖泊湖冰完全覆盖期总体上呈减少趋势，其中减少幅度最明显的是吉力湖。

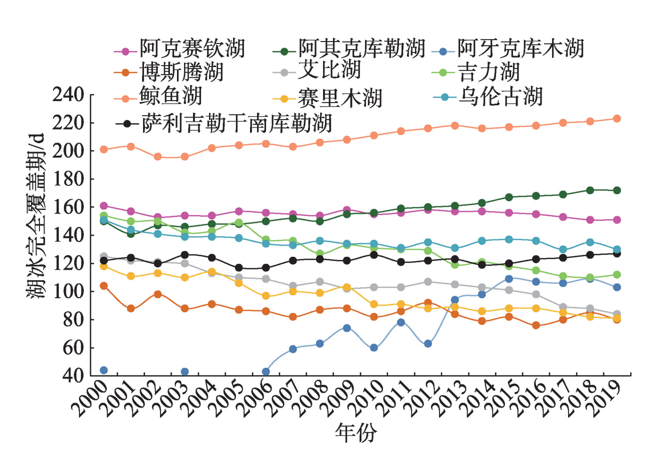


图5　2000—2019年新疆大型湖泊湖冰完全覆盖期年际变化

Fig. 5　Interannual variation of lake ice complete coverage of large lakes in Xinjiang during 2000—2019

4　讨 论

本文分析了2000—2019年新疆大型湖泊的湖冰物候特征，湖冰物候特征是区域气候变化灵敏指示器，张音等[30]研究指出近60 a新疆年均气温、年均降水量总体上均呈上升趋势，但区域空间变化规律不明显，因此本文对区域气候变化研究具有重要的参考意义。在全球气候变化背景下，很多研究结果得出在北半球大部分湖泊出现开始冻结日推迟和开始消融日提前的趋势。Dibike等[16]研究结果指出在1855—2004年分布在北半球湖泊的完全冻结日和完全消融日变化趋势分别为0.03~0.16 d·a⁻¹、−0.05~0.19 d·a⁻¹，湖冰完全覆盖期变化趋势

为$-0.07\sim-0.43$ d·a^{-1}。

图6为4个新疆大型湖泊湖冰冻融的变化趋势。由图6a~c所示，在2001年12月16日阿牙克库木湖湖面没有出现冰盖，但2010年12月16日湖泊出现完全结冰，2020年12月2日湖泊大部分区域已出现冰层，从湖泊结冰情况可以看出，近20 a阿牙克库木湖的开始冻结日表现为明显的提前趋势，这种变化趋势引起了湖冰完全覆盖期的延长。Cai等[11]对新疆湖冰物候变化研究发现，新疆大部分湖泊湖冰覆盖期出现显著的缩短趋势，但阿牙克库木湖等有些湖泊的湖冰完全覆盖期出现延长趋势，这种趋势与本文研究结果一致。从图6d~f中可知，2000年6月10日鲸鱼湖的湖冰完全消融，2012年6月15日鲸鱼湖的湖面有湖冰覆盖，2020年6月25日鲸鱼湖大部分区域仍出现湖冰，从这种变化趋势可以看出，近20 a鲸鱼湖的湖冰完全覆盖期呈延长趋势。图6g~i为赛里木湖的开始冻结日变化特征，2001年1月2日赛里木湖开始出现湖冰，而2009年1月9日湖面开始冻结，但2020年1月13日赛里木湖才出现冰层，从这种变化趋势可以看出，在研究期间赛里木湖的开始结冰日表现为推迟趋势，因此这种变化趋势缩短了赛里木湖的湖冰完全覆盖期。图6j~l显示了吉力湖的湖冰冻融过程，2001年6月3日吉力湖的湖冰完全消融，而2010年5月26日和2020年5月7日湖冰消融日呈提前趋势，通过3期的湖冰消融日可以得知，近20 a吉力湖的湖冰完全消融日表现为提前趋势，而这种变化趋势引起了吉力湖的湖冰覆盖期缩短。很多研究结果指出，湖泊的冻融情

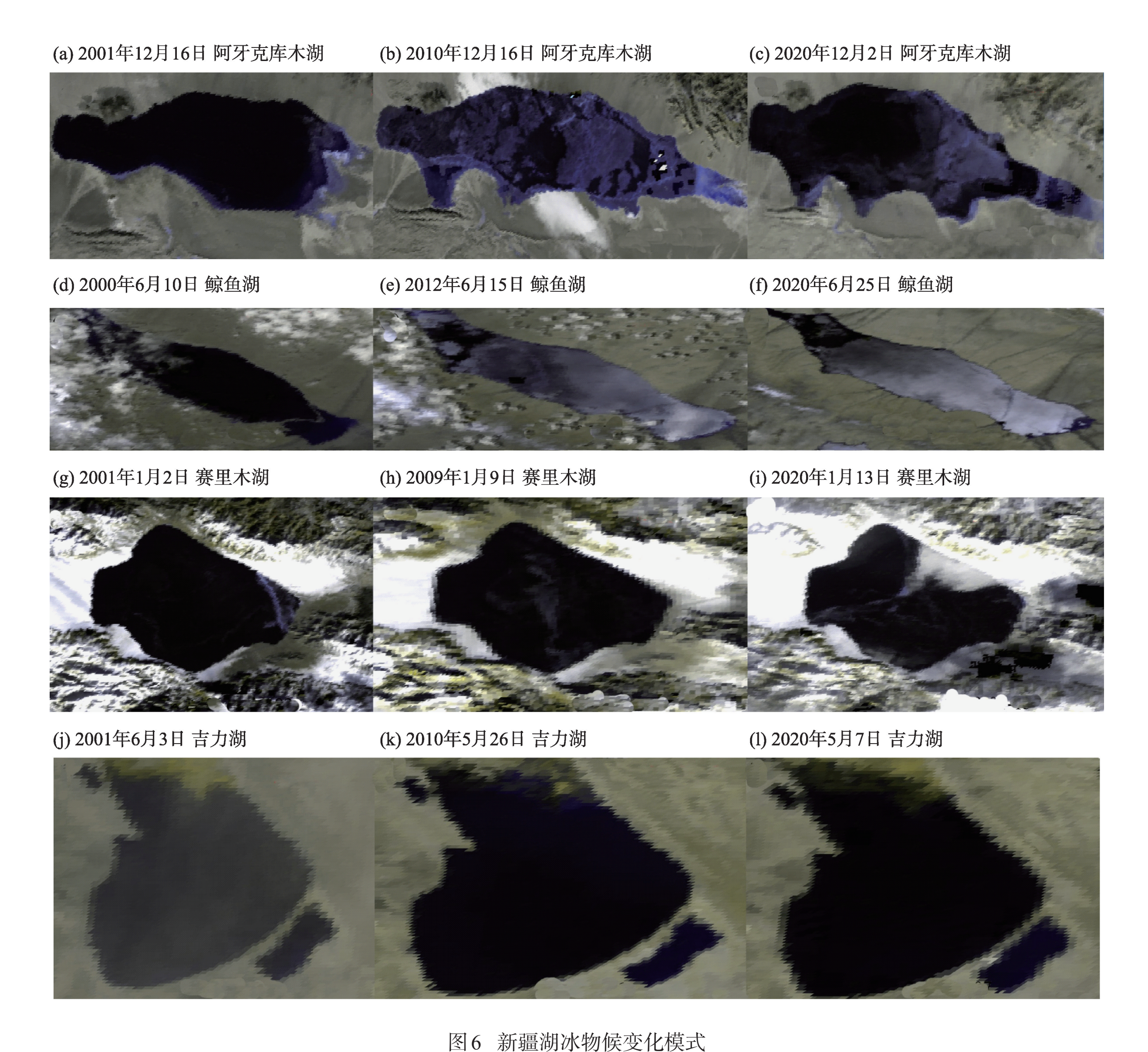


图6 新疆湖冰物候变化模式

Fig. 6 Lake ice phenology pattern in Xinjiang

况主要受到湖泊自身特征变化的影响[26,28]，例如，2000—2019年阿牙克库木湖的开始冻结日呈显著提前趋势，主要原因与湖泊面积显著扩张有关，而湖泊面积的扩张导致了湖泊矿化度下降，因此这种响应关系引起了开始冻结日提前和湖冰覆盖期的延长。秦启勇等[31]研究结果指出，2000—2019年赛里木湖的湖冰开始冻结日呈提前趋势，与本文的研究结果存在差异；而Cai等[11]研究发现赛里木湖的冻结日呈推迟趋势，湖冰完全覆盖期呈缩短趋势，与本文研究结果一致。

5 结 论

本文基于MOD09GQ、MYD09GQ等光学遥感数据，通过多波段阈值法提取了湖冰物候，在本研究提取的湖冰物候结果通过Sentinel-2数据进行了精度验证，此外还总结了气候变化背景下新疆湖泊湖冰冻融过程并分析了湖冰物候变化模式。主要结论如下：

（1）通过250 m空间分辨率MOD09GQ、MYD09GQ数据集对新疆大型湖泊进行了湖冰物候提取，过去研究通过8 d合成500 m分辨率的MODIS冰雪数据集对新疆湖冰物候进行研究，而本研究基于更高时空分辨率的MODIS数据集应用波段阈值法精准地提取了多种湖冰物候参数。

（2）湖冰完全覆盖期是重要的湖冰参数，湖冰覆盖期的延长或者缩短能够直接表示区域气候变化过程，新疆大部分湖泊湖冰完全覆盖期表现为缩短趋势，其中分布在新疆中北部的艾比湖、吉力湖和博斯腾湖等湖泊的湖冰完全覆盖期缩短较为明显，变化趋势分别为$-1.76\ d\cdot a^{-1}$，$-2.13\ d\cdot a^{-1}$和$-0.81\ d\cdot a^{-1}$。

（3）湖泊面积、湖泊矿化度等湖泊自身要素能够直接影响湖泊冻融过程。因此在研究期间阿牙克库木湖、鲸鱼湖等咸水湖的湖泊面积表现为明显扩张趋势，而这种变化引起了这些湖泊矿化度的下降，因此阿牙克库木湖、鲸鱼湖等湖泊的开始冻结日表现为提前，而湖冰完全覆盖期呈延长趋势。

由于本研究缺乏实测湖冰物候数据，因此在研究过程中无法对遥感监测的湖冰物候进行精度评价，除此之外，为了近一步系统地探讨湖冰物候的驱动因子机制，未来可以考虑冻土变化趋势和湖泊所在区域的冰川面积等因素。

参考文献（References）

[1] Magnuson J J, Roberton D M, Benson B J, et al. Historical trends in lake and river ice cover in the Northern Hemisphere[J]. Science, 2000, 289(1): 1743–1746.

[2] Livingstone D M. Break-up dates of alpine lakes as proxy data for local and regional mean surface air temperatures[J]. Climatic Change, 1997, 37(2): 407–439.

[3] Claude R D, Terry D P, Barrie R B, et al. Recent trends in Canadian lake ice cover[J]. Hydrological Processes, 2006, 20(4): 781–801.

[4] Wynne R H, Lillesand T M. Satellite observation of lake ice as a climate indicator-initial results from statewide monitoring in Wisconsin[J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 1993, 59(6): 1023–1031.

[5] Latifovic R, Pouliot D. Analysis of climate change impacts on lake ice phenology in Canada using the historical satellite data record [J]. Remote Sensing of Environment, 2007, 106(4): 492–507.

[6] 卞林根. 全球冰冻圈变化预测研究现状[J]. 极地研究, 2008, 6(3): 275–286. [Bian Lingen. Progress of prediction of the global cryosphere change[J]. Polar Research, 2008, 6(3): 275–286.]

[7] 曲斌, 康世昌, 陈锋. 2006—2011年西藏纳木错湖冰状况及其影响因素分析[J]. 气候变化研究进展, 2012, 8(5): 18–24. [Qu Bin, Kang Shichang, Chen Feng. Lake ice and its effect factors in the Nam Co Basin, Tibetan Plateau[J]. Climate Change Research, 2012, 8(5): 18–24.]

[8] Brown L C, Duguay C R. The response and role of ice cover in lake-climate interactions[J]. Progress in Physical Geography: Earth and Environment, 2010, 34(5): 671–704.

[9] Du J, Kimball J S, Duguay C, et al. Satellite microwave assessment of Northern Hemisphere lake ice phenology from 2002 to 2015[J]. The Cryosphere, 2017, 11(1): 47–63.

[10] Hodgkins G A. The importance of record length in estimating the magnitude of climatic changes: An example using 175 years of lake ice-out dates in New England[J]. Climatic Change, 2013, 119(3): 705–718.

[11] Cai Y, Ke C Q, Yao G H, et al. MODIS-observed variations of lake ice phenology in Xinjiang, China[J]. Climatic Change, 2020, 158(3): 575–592.

[12] Dörnhöfer K, Oppelt N. Remote sensing for lake research and monitoring recent advances[J]. Ecological Indicators, 2016, 64(1): 105–122.

[13] 魏秋方, 叶庆华. 湖冰遥感监测方法综述[J]. 地理科学进展, 2010, 29(7): 803–810. [Wei Qiufang, Ye Qinghua. A review of remote sensing monitoring methods for lake ice[J]. Progress in Geography, 2010, 29(7): 803–810.]

[14] 古力米热·哈那提, 张音, 苏里坦, 等. 季节性冻土水热对融雪及气温的响应[J]. 干旱区地理, 2021, 44(4): 889–896. [Hanati Gulimire, Zhang Yin, Su Litan, et al. Response of water and heat of

seasonal frozen soil to snow melting and air temperature[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(4): 889-896.]

[15] Comiso J C, Meier W N, Gersten R. Variability and trends in the Arctic sea ice cover: Results from different techniques[J]. Journal of Geophysical Research, 2017, 122(8): 6883-6900.

[16] Dibike Y, Powse T, Salorona T, et al. Response of Northern Hemisphere lake ice cover and lake water thermal pattern a changing climate[J]. Hydrological Process, 2011, 25(19): 242-253.

[17] Beier C M, Stella J C, Dovčiak M. Local climatic drivers of changes in phenology at a boreal-temperate ecotone in eastern North America[J]. Climatic Change, 2012, 115(2): 399-417.

[18] Futter M N. Patterns and trends in southern Ontario Lake ice phenology[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2003, 88(1): 431-444.

[19] Huntington T G, Hodgkins G A, Dudley R W. Historical trend in river ice thickness and coherence in hydroclimatological trends in Maine[J]. Climatic Change, 2003, 61(1-2): 217-236.

[20] Ding Y J, Liu S Y, Bai S Y E, et al. Climatic implications on variations of lakes in the cold and arid regions of China during the recent 50 years[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2006, 28 (5): 623-632.

[21] 巩志. 基于卫星遥感的青藏高原湖冰物候研究[D]. 杭州: 杭州师范大学, 2018. [Kong Zhi. Qinghai-Tibet Plateau lake ice phenology research based on the remote sensing[D]. Hangzhou: Hangzhou Normal University, 2018.]

[22] Dibike Y, Prowse T, Bonsal B, et al. Simulation of North American lake ice cover characteristics under contemporary and future climate condition[J]. International Journal of Climatology, 2012, 32 (5): 695-709.

[23] Hochschild V, Kropack J, Biskop S, et al. Multi-sensor remote sensing based modelling of the water balance of endorheic lakes on the Tibetan Plateau[J]. Remote Sensing and Hydrology, 2012, 25(3): 253-256.

[24] Chen X Q, Cui P, Li Y, et al. Changes in glacial lakes and glaciers of post-1986 in the Poiqu River Basin, Nyalam, Xizang (Tibet)[J]. Geomorphology, 2007, 88(3-4): 298-311.

[25] 沈水平, 王国亚. IPCC第一工作组第五次评估报告对全球气候变化认知的最新科学要点[J]. 冰川冻土, 2013, 35(5): 1068-1076. [Shen Shuiping, Wang Guoya. Key findings and assessment results of IPCC Fifth Assessment Report[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(5): 1068-1076.]

[26] 王智颖, 吴艳红, 常军. 青藏高原湖冰物候的时空变化及其影响因素[J]. 北京工业大学学报, 2017, 43(5): 701-709. [Wang Zhiying, Wu Yanhong, Chang Jun. Temporal and spatial variation of lake ice phenology and its influencing factors in the Tibetan Plateau[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2017, 43(5): 701-709.]

[27] Wang C L, Jiang W G, Deng Y, et al. Long time series water extent analysis for SDG 6.6.1 based on the GEE platform: A case study of Dongting Lake[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2022, 15(1): 490-503.

[28] 汪关信. 青海湖湖冰物候特征及其变化[D]. 兰州: 兰州大学, 2020. [Wang Guanxin. Lake ice characteristics and changes in Qinghai Lake[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2020.]

[29] 李晓峰. 基于MODIS数据的高原湖泊冰情遥感监测方法研究——以青藏高原为例[D]. 兰州: 西北师范大学, 2018. [Li Xiaofeng. Plateau lake ice observing methods based on the MODIS data: A case of Qinghai-Tibet Plateau[D]. Lanzhou: Northeast Normal University, 2018.]

[30] 张音, 古丽贤·吐尔逊拜, 苏里坦, 等. 近60 a来新疆不同海拔气候变化的时空特征分析[J]. 干旱区地理, 2019, 42(4): 822-829. [Zhang Yin, Tuerxunbai Gulixian, Su Litan. Spatial and temporal characteristics of climate change at different altitudes in Xinjiang in the past 60 years[J]. Arid Land Geography, 2019, 42(4): 822-829.]

[31] 秦启勇, 李雪梅, 张博, 等. 2000—2019年赛里木湖湖冰物候特征变化[J]. 干旱区地理, 2022, 45(1): 37-45. [Qin Qiyong, Li Xuemei, Zhang Bo, et al. Change of ice phenology in the Sayram Lake from 2000 to 2019[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(1): 37-45.]

Temporal and spatial variations of lake ice phenology in large lakes of Xinjiang from 2000 to 2019

Aierken TUERSUN[1], Yusufujiang RUSULI[1,2], CUI Yishuang[1], Kadiayi ALIMU[1], Miriayi MAITUDI[1]

(1. Institute of Geographical Science and Tourism/Laboratory of Information Integration and Eco-Security, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, Xinjiang, China; 2. Xinjiang Key Laboratory of Lake Environment and Resources in Arid Zone, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, Xinjiang, China)

Abstract: Lake ice phenology is considered to be an accurate indicator of regional climate change. This work studies the changes in the ice characteristics of the large lakes in Xinjiang, China. The lakes chosen in this study are equally distributed in the oasis and mountain areas. With their different geographical locations, the evolution and ice conditions of the lakes are influenced by human activities to different extents; thus, these lakes are ideal research items for research on arid-semiarid areas. This study conducts an analysis predominantly based on long term MODIS and Landsat data, which is used to reveal the phenological characteristics of lake ice on the large lakes in Xinjiang during the period 2000—2019 via multiband threshold analysis, trend analysis, and other methods. The results of this work can be summarized as follows: (1) Lakes in Xinjiang begin to freeze in the period from October to December every year, and their ice cover periods end in the period from March to June; during the study period the lakes that exhibited a freeze-up start (FUS) increasingly late in the year were Bosten Lake, Sayram Lake, Ebinur Lake, Jingyu Lake, Ulunggur Lake, and Surigh Yilganing Kol Lake; the rate of change of the FUS was between 0.51−1.53 $d \cdot a^{-1}$. The break-up start occurred later in the year for Ayakkum Lake, Aksayqin Lake, and Aqikkol Lake; the change rate of this trend was found to be −1.04 $d \cdot a^{-1}$, −0.41 $d \cdot a^{-1}$, −0.31 $d \cdot a^{-1}$, respectively. (2) The complete freeze duration (CFD) is one of the most important parameters in ice phenology, which can be used to directly represent the process of climate change. Most lakes showed a decrease in CFD between the years 2000 and 2019, among them Ebinur Lake, Jili Lake, and Bosten Lake had significant reduction in CFD, with a rate of change of −1.76 $d \cdot a^{-1}$, −2.13 $d \cdot a^{-1}$, −0.81 $d \cdot a^{-1}$, respectively, whereas Ayakkum Lake has the highest increase in CFD among all lakes in Xinjiang (3.51 $d \cdot a^{-1}$). (3) The variations in phenology and evolution of the ice cover of the Xinjiang large lake are the result of local and climate-related factors. The temperature, lake morphology factors, lake area, and shape of the shore line are found to be the principal factors that affect the phenology of lake ice. However, the effect of lake salinity and geological structure of lake ice evolution cannot be neglected. As the climatic conditions of Xinjiang has evolved toward being warmer and wetter, most lakes show a reduction in CFD. This study on the phenological characteristics of lake ice on the many lakes in Xinjiang provides data related to arid/semiarid areas that until now have lacked data and provides more accurate parameter indicators and a scientific basis for studying climate change.

Key words: large lakes; lake ice phenology; variation characteristics; multi-band threshold; MODIS